



THE UNIVERSITY *of* EDINBURGH

Edinburgh Research Explorer

## Caratterizzazione dell'aerodinamica di imbarcazioni a vela con prove in galleria del vento

### Citation for published version:

Fossati, F, Muggiasca, S, Vallicelli, A & Viola, IM 2006, 'Caratterizzazione dell'aerodinamica di imbarcazioni a vela con prove in galleria del vento', Paper presented at IX Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento, Italy, 18/06/06 - 21/06/06.

### Link:

[Link to publication record in Edinburgh Research Explorer](#)

### Document Version:

Peer reviewed version

### General rights

Copyright for the publications made accessible via the Edinburgh Research Explorer is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

### Take down policy

The University of Edinburgh has made every reasonable effort to ensure that Edinburgh Research Explorer content complies with UK legislation. If you believe that the public display of this file breaches copyright please contact [openaccess@ed.ac.uk](mailto:openaccess@ed.ac.uk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



# Caratterizzazione dell'Aerodinamica di Imbarcazioni a Vela con prove in galleria del Vento

F. Fossati <sup>a</sup>, S. Muggiasca <sup>b</sup>, A. Vallicelli <sup>c</sup>, I.M. Viola <sup>b</sup>

<sup>a</sup>CIRIVE – Politecnico di Milano, Milano

<sup>b</sup>Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Milano, Milano

<sup>c</sup>Dipartimento IDEA - Facoltà di Architettura di Pescara

**PAROLE CHIAVE:** Galleria del Vento, Aerodinamica di Piani Velici, Sailing Yacht Aerodynamics, Rig Test, Heeling Model, Twisted Flow Wind Tunnel.

## ABSTRACT

In questo lavoro si presenta l'attività di ricerca sperimentale svolta presso la Galleria del Vento del Politecnico di Milano sulla caratterizzazione dei piani velici: l'impianto della galleria del vento, le procedure di prova e la successiva analisi dei dati, fino alla definizione dei coefficienti di forza che vengono utilizzati per la valutazione delle performance dell'imbarcazione con programmi VPP (*Velocity Prediction Program*).

In ultimo, si presenta una innovativa metodologia di prova basata su un sistema *Hardware In the Loop* (HIL) sviluppato dal dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. Questa nuova procedura consente di effettuare le regolazioni delle vele ottimizzando direttamente la velocità dell'imbarcazione anziché la componente di forza all'avanzamento, come viene invece generalmente fatto. Questo è possibile utilizzando un modello d'imbarcazione il cui assetto trasversale (rollio) è regolato da un servo meccanismo controllato da PC.

This paper presents sailing yacht wind tunnel testing activities carried out in the Politecnico di Milano Twisted Flow Wind Tunnel. In particular test arrangement, procedures and methodologies that have been developed both for systematic gathering of wind tunnel data and subsequent analysis in order to describe aerodynamic behaviour of the rig and to derive sail force coefficients for VPP use, are outlined.

Finally a different wind tunnel sails testing procedure, based on an hardware in the loop device, developed by the Mechanical Department of the Politecnico di Milano is described.

Aim of this new testing procedure is to change the wind tunnel testing process by enabling the test operator to trim the sails to maximise the yacht speed rather than the driving force, which is the current followed procedure using conventional testing approaches.

## 1 LA GALLERIA DEL VENTO DEL POLITECNICO DI MILANO

La riconosciuta eccellenza del Politecnico di Milano nel campo dell'ingegneria del vento e nell'aerodinamica generale, ha portato alla realizzazione di una nuova galleria del vento adatta ad un'ampia gamma di applicazioni con una alta qualità del flusso. La galleria del vento è stata inaugurata nel settembre del 2001 e da allora è stata notevolmente utilizzata per svolgere attività di ricerca nel settore delle imbarcazioni a vela. In particolare sono state svolte numerose attività sulle imbarcazioni di classe Coppa America nella scorsa campagna del 2003 per il sindacato *Prada* e in quella in corso per il sindacato *LunaRossa Challenger*.

### 1.1. Caratteristiche principali

Le figure 1 e 2 mostrano una panoramica della Galleria del Vento del Politecnico di Milano. Questa è un circuito chiuso ad anello verticale ove sono presenti due camere di prova. La prima, di sezione 14x4m, occupa tutta la parte superiore dell'anello per uno sviluppo longitudinale di quasi 40m, il quale consente la generazione di strato limite. La seconda di sezione 4x4m consente di avere alte velocità e bassi livelli di turbolenza e si trova a valle di un convergente nella parte inferiore dell'anello. Le due differenti camere di prova e le differenti caratteristiche dei due flussi, consentono alla struttura di essere utilizzata per un'ampia gamma di applicazioni ingegneristiche.

Le dimensioni particolarmente ampie della camera di prova a strato limite, consentono di testare modelli di grandi dimensioni che includono la riproduzione di ampie zone di territorio circostante. Le dimensioni dell'area trasversale ( $56\text{m}^2$ ) consente valori di bloccaggio molto bassi anche con modelli grandi. I modelli vengono collocati su un tavolo girevole movimentato su film d'aria e controllato in remoto dalla camera di controllo, con un carico massimo di 100kN. Quando non vengono utilizzati generatori di turbolenza si misura un flusso molto regolare a meno di variazioni dell'ordine del  $\pm 3\%$  attraverso la sezione trasversale e indice di turbolenza inferiore al 2%. Diversamente, è possibile installare i convenzionali generatori di turbolenza (*spires, roughness elements*) di varie dimensioni e geometrie per riprodurre flussi più o meno turbolenti e diversi profili di velocità. I profili possono anche essere generati con l'utilizzo differenziale dei 14 ventilatori assiali di dimensioni 2x2m ognuno, controllati individualmente, posti su 2 schiere orizzontali da 7 unità ciascuna. Infine, è stato realizzato un generatore attivo di turbolenza per fluttuazioni a basse frequenze. Tra i motori e la camera di prova a generazione di strato limite vi è uno scambiatore di calore che consente di controllare la temperatura del flusso e di operare in continuo a temperatura costante.

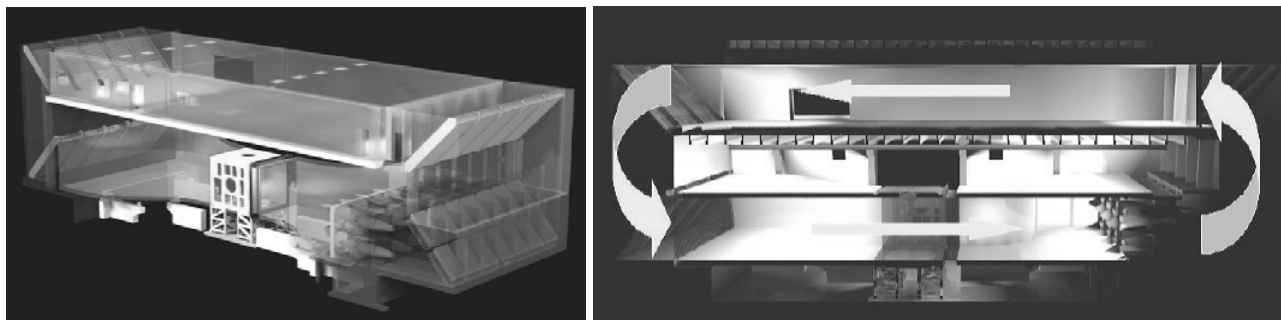


Figura 1 e 2. La Galleria del Vento del Politecnico di Milano: *rendering* trasparente e sezione longitudinale

Per quanto concerne le ricerche su imbarcazioni a vela, la camera di prova a generazione di strato limite consente l'utilizzo di modelli di grandi dimensioni con bassi valori di bloccaggio e velocità massime di 16m/s. I valori tipici delle scale dei modelli sono: 1:10 per imbarcazioni di 40-50 piedi; 1:12 per MAXI yacht e International America's Cup Class (IACC). Inoltre, lo sviluppo longitudinale della camera consente di provare contemporaneamente diversi modelli allo scopo di studiare l'interazione tra più imbarcazioni che navigano sullo stesso specchio d'acqua.

La seconda camera di prova è caratterizzata da una particolare uniformità del flusso: dell'ordine del  $\pm 0.2\%$  sulla sezione trasversale e livelli di turbolenza inferiori al 0.15%. La camera, che ha una sezione di 4x4m, permette di ottenere velocità superiori a 200 km/h ed è pertanto adatta alla realizzazione di flussi ad alti Reynolds. In particolare nel campo delle imbarcazioni, la camera di prova ad alte velocità è indicata per prove su appendici di carena che possono essere testate in scala 1:2 come abitualmente avviene per gli IACC.

### 1.2 Il dispositivo per la generazione di twist

Il flusso incidente su un'imbarcazione che naviga con una propria velocità, è dovuto sia alla presenza del vento atmosferico dotato di un suo profilo verticale di velocità, sia dal moto proprio dell'imbarcazione. La somma di questi due contributi (il primo aumenta con la quota, il secondo è invece costante) fa sì che il vento apparente che investe l'imbarcazione, dal livello del mare fino alla parte più alta della barca, sia sempre più forte e sempre più ruotato verso poppa. Questa rotazione della vena incidente viene generalmente indicata con il termine *twist*. Le vele

dell'imbarcazione vengono regolate di conseguenza con l'intento di dar loro una rotazione analoga e mantenere un corretto angolo di attacco tra la vena incidente alle varie quote e le sezioni orizzontali delle vele. Questo aspetto è particolarmente critico quando si prova in galleria del vento poiché le forze sviluppate dal piano velico dipendono dal vento incidente e dalla regolazione impartita alle vele. Ne consegue la necessità di riprodurre il corretto profilo di velocità verticale e il twist della vena. Come abbiamo detto sopra, mentre il profilo verticale di velocità può essere generato con i convenzionali metodi o con l'utilizzo differenziale dei motori, la generazione di twist risulta particolarmente difficile. Durante l'attività di ricerca svolta dal Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano per il sindacato di Coppa America *Prada* nella campagna del 2003, i dati sperimentali hanno evidenziato la necessità di realizzare un dispositivo per la generazione di twist in galleria del vento. La realizzazione del dispositivo è stata terminata nel luglio 2004. Il dispositivo consiste in una schiera di 15 ali verticali posta a monte del tavolo girevole in modo da occupare il terzo centrale della sezione della camera. Le figure 3 e 4 mostrano la schiera di ali, ognuna alta 4m quanto la camera, larga 0.7m e spessa appena 5mm. La figura 3 è ripresa mostrando le spalle al vento mentre la figura 4 è ripresa dal modello guardando il vento. Le ali sono tutte parallele tra loro e poste ad una distanza di 0.35m l'una dall'altra. Sono orientate in modo tale da deflettere il flusso che le attraversa verso sinistra nella parte prossima al pavimento e verso destra nella parte alta vicino al soffitto. La progettazione del dispositivo con tecniche CFD ha consentito di ottenere una vena *twistata* stabile per un'ampia regione della camera di prova a valle del dispositivo. I particolari strumenti di progettazione utilizzati, le soluzioni tecnologiche adottate e le verifiche sperimentali a valle della realizzazione del dispositivo sono presentate in questa medesima sede da Fossati *et al.*, 2006.



Figura 3 e 4: il dispositivo per la generazione di twist visto con le spalle al vento e fronte al vento.

## 2 PROVE SU IMBARCAZIONI A VELA

### 2.1 Procedure di prova e misura

Un modello completo dell'*opera morta* dell'imbarcazione (la parte al di sopra del piano di galleggiamento), completo di coperta, albero, sartame e vele, viene montato su una bilancia dinamometrica a 6 componenti, a sua volta fissata al centro del tavolo girevole nella camera di prova a strato limite. La bilancia è posizionata nel modello in modo tale da avere l'asse X allineato con l'asse longitudinale del modello e l'asse Z verticale verso l'alto. Il modello può essere fissato con un angolo di sbandamento a scelta. Le dimensioni della sezione della camera consentono l'utilizzo di modelli di grandi dimensioni e questo, a sua volta, permette di realizzare le vele con le usuali tecniche di veleria, di utilizzare la componentistica tipica del modellismo per il sartame,

verricelli, scotte, etc. Tutto il piano di coperta può essere riprodotto in scala consentendo di regolare le vele attraverso i medesimi circuiti con cui vengono regolate al vero. In tal modo è possibile avere, ad esempio, arridatoi per regolare il sartame, i circuiti delle drizze, *cunningham*, *vang*, base randa, carica alto e basso, etc, tutti regolabili. I modelli vengono approntati utilizzando fino a 7 verricelli elettrici che, comandati in remoto dalla camera di controllo, servono a regolare le manovre correnti più importanti quali scotte, carrelli, tangone, etc. I verricelli sono proporzionali in modo tale da consentire la registrazione della regolazione e permettere la ripetibilità della misura. Inoltre, anziché essere manovrati da una consolle in camera di controllo, è possibile anche manovrarli con un normale radiocomando da modellismo mentre si è dentro la camera di prova. In figura 5 e 6 è mostrato un tipico modello di imbarcazione a vela in camera di prova (senza dispositivo per la generazione del twist).

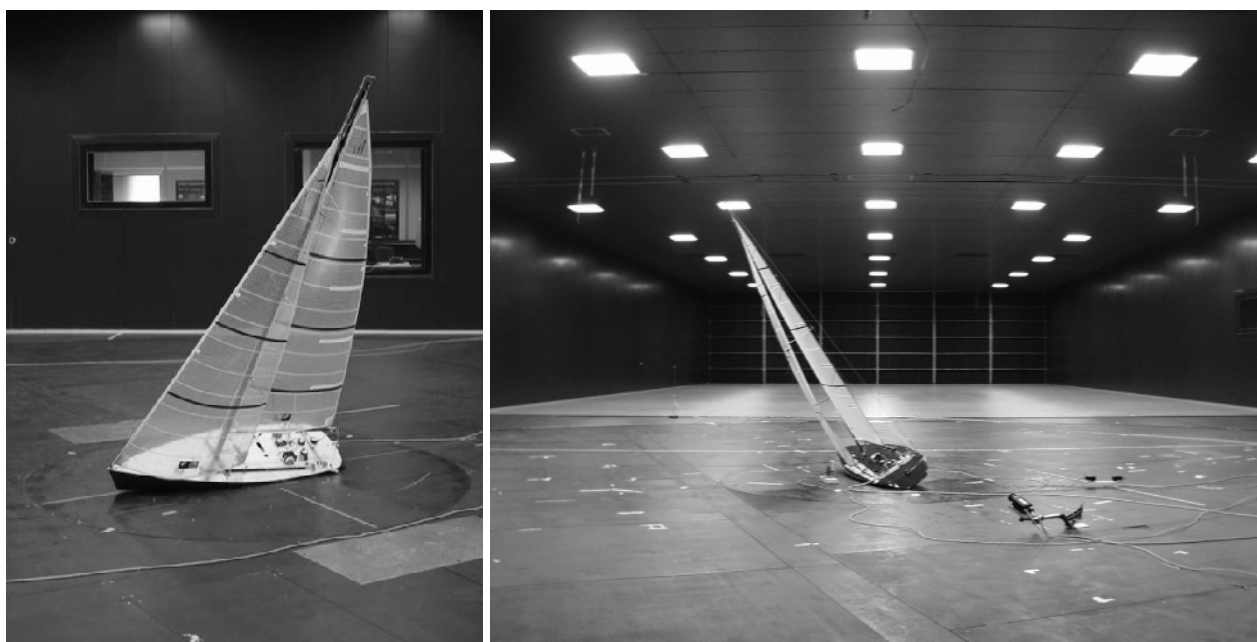


Figura 5 e 6. modello di imbarcazione in andatura di bolina durante una sessione di prova.

Per definire il profilo di velocità e il twist del flusso incidente da riprodurre bisogna prendere in considerazione diversi fattori come: velocità stimata e andatura dell'imbarcazione, nonché caratteristiche del luogo in cui sta navigando (profilo verticale di velocità e tipologia della turbolenza atmosferica). Questi fattori determinano la scelta per quanto attiene ai rapporti tra le differenti velocità di rotazione dei 14 motori, l'eventuale utilizzo di generatori di turbolenza e la regolazione del dispositivo per la generazione di twist. Durante la prova la velocità del flusso viene tenuta costante. In particolare, nelle andature di bolina si preferisce raggiungere la massima velocità del flusso sostenibile dal modello e dai verricelli elettrici, mentre provando vele per andature portanti si preferisce riprodurre al meglio il rapporto tra le forze peso e le forze aerodinamiche "di galleggiamento" che agiscono sulla vela per consentirne la corretta regolazione. La rotazione del tavolo girevole definisce l'angolo al vento apparente e il modello viene fissato alla bilancia con un predeterminato angolo di sbandamento. Fissate queste condizioni di prova, vengono testate diverse regolazioni delle vele operando in remoto sui verricelli elettrici. Attraverso una grande finestra, dalla camera di controllo, è possibile vedere chiaramente il modello e, ad esempio, i filetti di lana sulle vele. Inoltre diverse telecamere sono poste intorno e sul modello in modo da poter regolare le vele dai migliori punti di osservazione e anche da quelli da cui normalmente si opera da bordo. In figura 7 e 8 si possono osservare due diverse regolazioni delle vele ritratte dalla telecamera posta sul soffitto. Per ogni regolazione delle vele, vengono acquisiti i segnali della bilancia e tutte le grandezze di controllo della vena per un periodo ed una frequenza a scelta, in genere 30 secondi di campionamento a 100 Hz. I programmi di acquisizione in Matlab sono stati scritti e vengono personalizzati di volta in volta a seconda delle applicazioni specifiche dal Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.

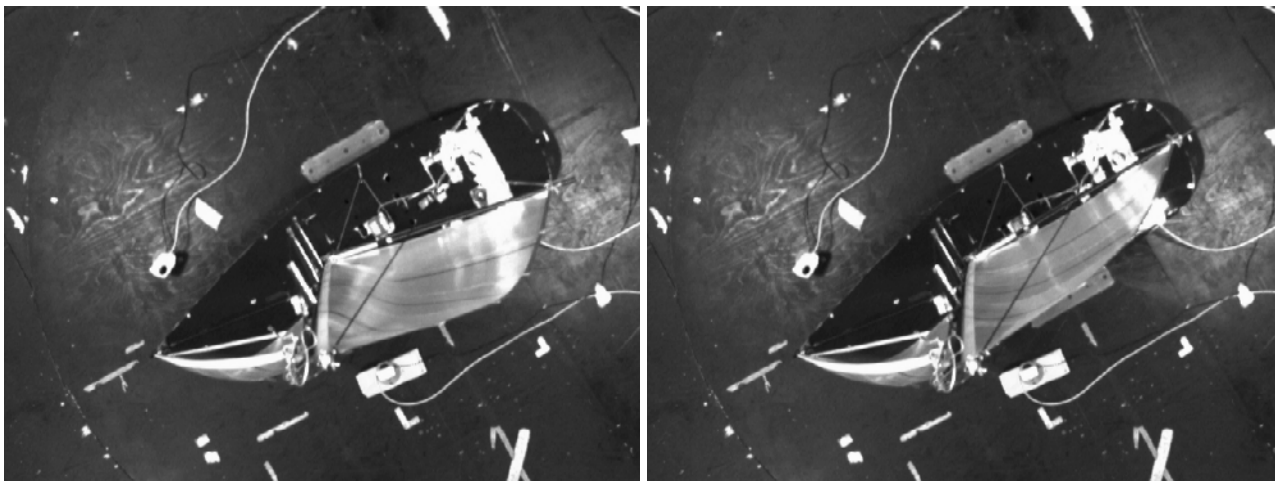


Figura 7,8. la telecamera di controllo posta sul soffitto riprende due diverse regolazioni delle vele misurate.

Recentemente è stata messa a punto una procedura di ricostruzione della geometria tridimensionale delle vele durante lo svolgimento della prova in galleria mediante tecniche di fotogrammetria, in modo da poter associare ad ogni regolazione delle vele la corrispondente geometria del piano velico. Per alcune configurazioni e regolazioni delle vele di particolare interesse, tramite riprese effettuate mediante telecamere, o mediante scatti fotografici ad alta risoluzione, o mediante l'utilizzo di particolari telecamere agli infrarossi, viene ripreso il modello con le vele. Successivamente le immagini o i filmati vengono elaborati e si ricostruisce la geometria tridimensionale del modello. In figura 9 si vedono i riflessi di particolari marcatori sensibili agli infrarossi, in figura 10 le coordinate spaziali dei marcatori vengono riconosciute attraverso un'analisi trigonometrica e applicando opportune correzioni prospettiche, in figura 11 si ricostruiscono le superfici delle vele.

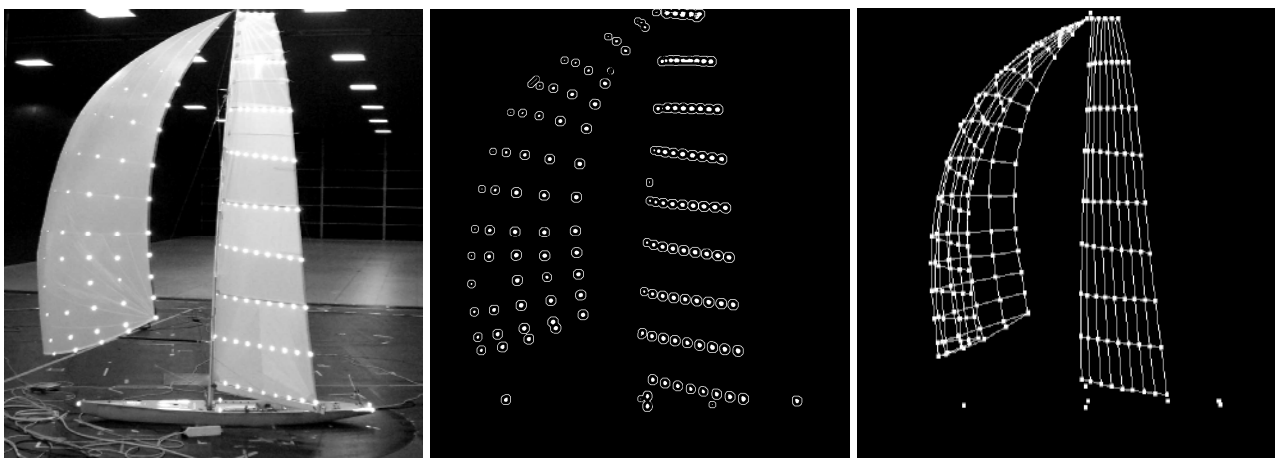


Figura 9,10 e 11. la forma delle vele ripresa dalle telecamere attraverso dei marcatori sensibili all'infrarosso viene trasformata in una superficie tridimensionale in un ambiente virtuale.

Questa procedura consente, oltre che di associare una geometria 3D alla regolazione impartita alle vele, di generare il modello matematico per simulazioni di fluidodinamica numerica (CFD). In tal modo è possibile prima di tutto validare i risultati numerici confrontandoli con le misure sperimentali. Successivamente, validati i risultati numerici, si dispone di una mappa completa delle componenti di velocità e della pressione in tutta la regione circostante il modello con grandissimo livello di dettaglio. In tal modo si conosce il comportamento del flusso in regioni ove non sarebbe altrimenti possibile effettuare misure sperimentali quali, ad esempio, misure dello strato limite. In figura 12 si osservano le traiettorie delle particelle fluide intorno al gennaker e alla randa. In figura 13 è presentata una sezione orizzontale del medesimo campo di velocità indicato con vettori.

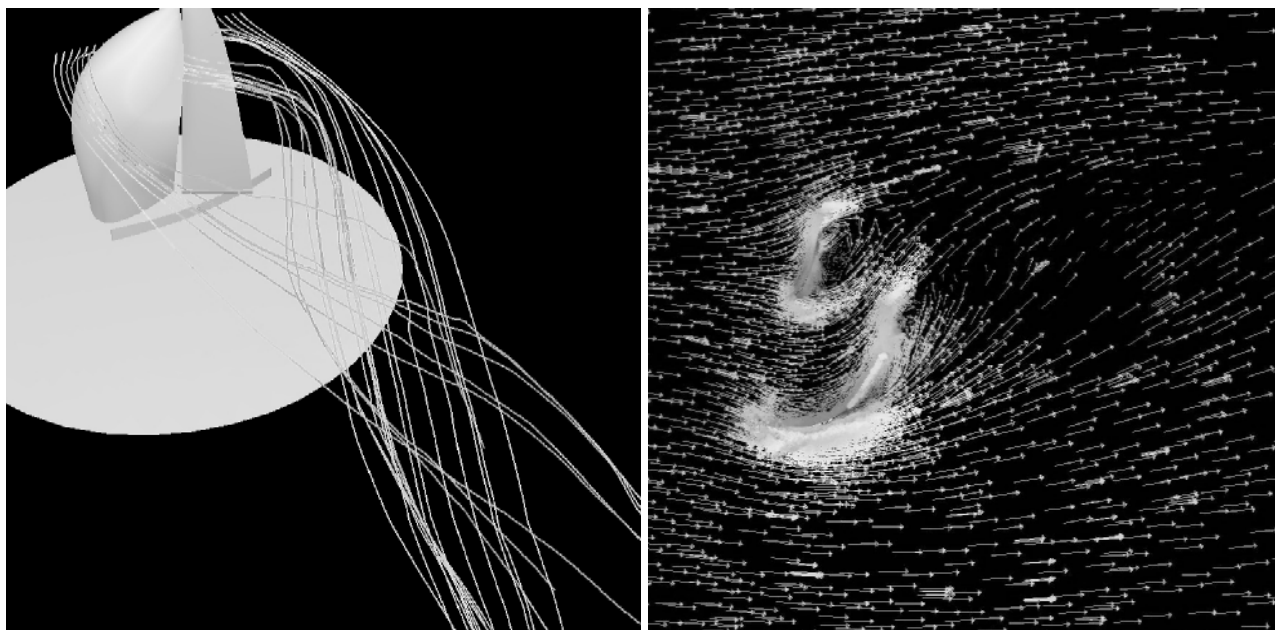


Figura 12 e 13. la geometria acquisita con le telecamere viene utilizzata per effettuare delle analisi CFD. A sinistra le traiettorie delle particelle fluide attorno a un gennaker, a destra il campo di moto di una sezione orizzontale descritto dai vettori velocità.

## 2.2 Prove in andature di bolina

Per confrontare diversi piani velici (con differenti regolazioni delle vele in varie condizioni di prova), normalmente si preferisce utilizzare coefficienti adimensionali, dividendo le forze misurate per una pressione dinamica di riferimento. In questo modo è possibile confrontare l'efficienza di vele che hanno diverse superfici e che sono state provate con diversi valori di pressione dinamica (Campbell & Claughton, 1994).

Il primo confronto che è possibile effettuare, valuta la variazione del coefficiente di spinta all'avanzamento ( $C_x$ ) rispetto al coefficiente di forza laterale ( $C_y$ ). A titolo di esempio, in figura 13 si mostra l'andamento di  $C_x$  rispetto a  $C_y$  per 4 angoli al vento apparente (AWA) provati:  $24^\circ$ ,  $26^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $35^\circ$ . Per ogni AWA si cercano le regolazioni delle vele che danno il massimo  $C_x$  per diversi valori di  $C_y$ . La prima regolazione delle vele che l'operatore ricerca è quella che massimizza  $C_x$  indipendentemente dal valore di  $C_y$ . In generale, tesando le scotte delle vele si ottiene un incremento di  $C_x$  e di  $C_y$ . Tuttavia, tesando le scotte eccessivamente si producono ampie zone di flusso separato con conseguente crollo di  $C_x$  a fronte di un incremento di  $C_y$ . Dopo aver trovato la regolazione con il massimo  $C_x$  assoluto, si comincia a lasciare il carrello della scotta della randa per ridurre l'angolo di attacco della vela e trovare i massimi  $C_x$  corrispondenti a  $C_y$  via via decrescenti. Una volta lasciato completamente il carrello si lascia anche la scotta della randa per aumentare il twist della vela. Le curve in figura 14 sono l'involuppo dei valori di  $C_x$  su  $C_y$ , ovvero per ogni valore di  $C_y$  si considera solo il massimo valore di  $C_x$ .

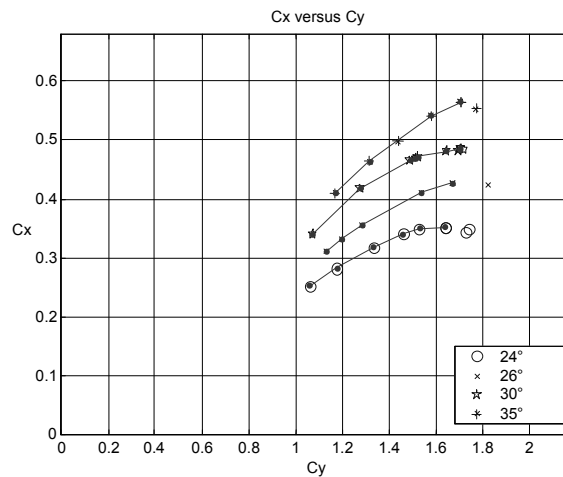


Figura 14. i valori del coefficiente di spinta all'avanzamento ( $C_x$ ) e di forza laterale ( $C_y$ ) per diverse regolazioni delle vele. Le quattro curve sono tutte ad angolo di sbandamento nullo e rispettivamente per angoli al vento (AWA) di  $24^\circ$ ,  $26^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $35^\circ$ .

Misurando il momento sbandante e dividendolo per la forza laterale, è possibile determinare l'altezza del centro di spinta ( $C_{eh}$ ). In figura 15 è rappresentata la variazione dell'altezza del centro di spinta, adimensionalizzato sull'altezza del triangolo di prua ( $I$ ), rispetto a  $C_y$ . La curva unisce i punti corrispondenti alle misure selezionate in fig. 14 come involuppo di  $C_x$  su  $C_y$ . Si osserva che al diminuire di  $C_y$  si ha una diminuzione dell'altezza del centro di spinta. Questo è dovuto al fatto che le regolazioni, al diminuire di  $C_y$ , sono effettuate diminuendo l'angolo di attacco della randa (quindi scaricandola). Non varia invece la regolazione della vela di prua che ha un centro velico più basso.

La posizione longitudinale del centro di spinta ( $C_{ea}$ ) è determinata dividendo il momento sbandante per la forza laterale. In figura 16 è rappresentata la variazione di  $C_{ea}$ , misurata dal centro della bilancia collocata poco dietro l'albero con valori positivi verso prua. La curva unisce i punti corrispondenti alle misure selezionate in fig. 14. Si può osservare che  $C_{ea}$  si muove avanti quando si riduce  $C_y$ , per considerazioni analoghe a quanto detto per  $C_{eh}$ .

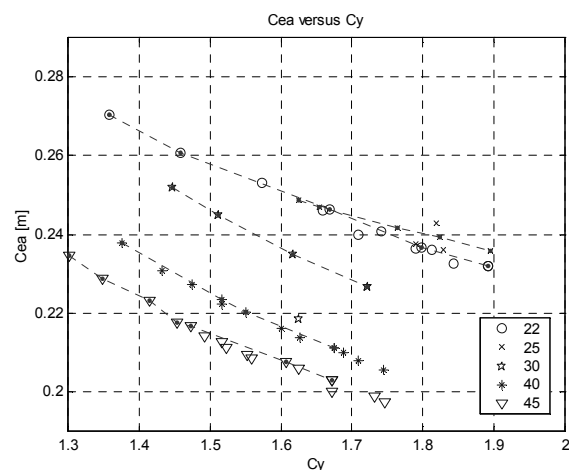
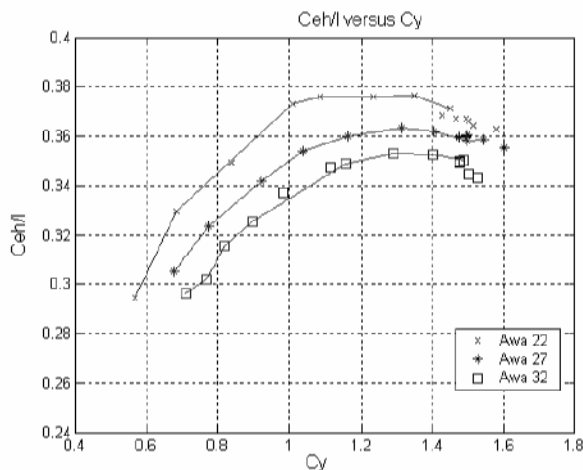


Figura 15 e 16. A sinistra l'andamento dell'altezza del centro velico adimensionalizzato sull'altezza del triangolo di prua ( $C_{eh}/I$ ) e, a destra, l'andamento della posizione longitudinale dal centro della bilancia dinamometrica dello stesso, entrambi in funzione del coefficiente di forza laterale ( $C_y$ ). Le curve sono tutte ad angolo di sbandamento nullo e rispettivamente per angoli al vento (AWA) da  $22^\circ$  a  $45^\circ$ .

Altre interessanti considerazioni possono essere fatte se si considerano i coefficienti di portanza ( $C_l$ ) e resistenza ( $C_d$ ), ovvero le componenti di forza adimensionalizzate con la pressione dinamica di riferimento secondo la direzione di provenienza del vento apparente e quella ad essa perpendicolare. In figura 17 e 18 sono rappresentate la variazione di  $C_l$  e  $C_d$  rispetto ad AWA. I rombi in neretto indicano le regolazioni corrispondenti al massimo valore di  $C_x$ . Si osserva che, per



ogni AWA, la regolazione corrispondente al massimo  $C_x$  non coincide con la massima portanza ottenibile. Questo è dovuto al fatto che la regolazione corrispondente alla massima portanza ha una risultante sfavorevolmente ruotata verso poppa e questo è tanto più vero quanto più AWA è minore di  $90^\circ$ .

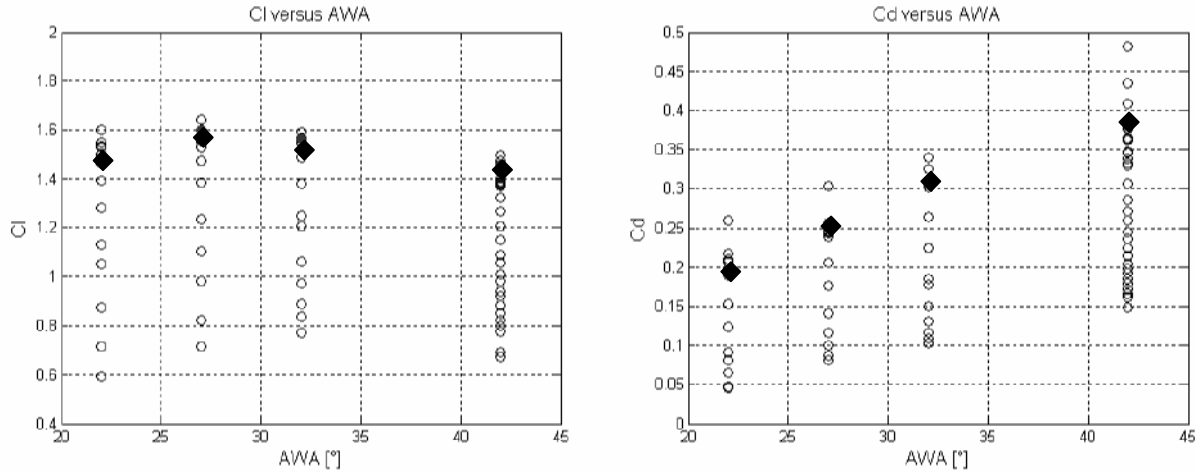


Figura 17 e 18. a sinistra il coefficiente di portanza ( $C_l$ ) e a destra di resistenza ( $C_d$ ) in funzione dell'angolo al vento (AWA). I cerchi indicano tutti i valori misurati e i rombi in neretto i valori corrispondenti al massimo  $C_x$ .

In figura 19 è rappresentato l'andamento di  $C_d$  rispetto al quadrato di  $C_l$ . La curva unisce i punti corrispondenti alle misure selezionate in figura 14 come involucro di  $C_x$  su  $C_y$ . Questo grafico consente di analizzare le diverse componenti di resistenza (Claughton *et al.*, 1998) grazie al fatto che, sia la resistenza indotta, sia buona parte della resistenza di forma, variano con  $C_l^2$ . Fintanto che si considerano regolazioni con bassi valori di  $C_l^2$ , l'incremento di  $C_d$  è principalmente legato all'aumento della resistenza indotta. Per questo motivo l'andamento di  $C_d$  vs  $C_l^2$  risulta inizialmente pressoché lineare (figura 20). Valutando la *pendenza* della retta su cui appoggia le curva  $C_d$  vs  $C_l^2$  si può determinare l'altezza effettiva ( $H_{eff}$ ). Questa può essere considerata una misura dell'efficienza del piano velico e viene determinata con la seguente equazione.

$$H_{eff} = \sqrt{\frac{\text{sup velica}}{\pi \cdot \text{pendenza}}} \quad (1)$$

Inoltre, è possibile determinare la resistenza residua ( $C_{d0}$ ) corrispondente all'intercetta della retta con l'asse verticale passante per  $C_l^2 = 0$ . Per valori elevati di  $C_l^2$ , invece,  $C_d$  aumenta più che linearmente. Ciò è dovuto alla separazione del flusso nella parte alta della randa.

Questa ultima rappresentazione dei risultati sperimentali in termini di portanza e resistenza, risulta particolarmente interessante per utilizzare programmi VPP. Infatti, tutte le possibili regolazioni della vela sono generalmente descritte con l'utilizzo di un coefficiente di portanza ( $C_{l_{max}}$  corrispondente al massimo  $C_x$ ), del coefficiente di resistenza residua ( $C_{d0}$ ) e dell'altezza effettiva ( $H_{eff}$ ).

Per esempio, il modello aerodinamico del VPP integrato nel International Measurement System (IMS) modella le diverse regolazioni impartite alle vele con una riduzione di  $C_d$  secondo la seguente relazione:

$$C_d = \frac{C_l^2 \text{ sup velica}}{\pi \cdot H_{eff}^2} \quad (2)$$

In figura 20, per un fissato AWA, sono presentate, con triangoli, le coppie di valori  $C_d$ - $C_l^2$  misurate. I triangoli che corrispondono all'involucro di  $C_x$  su  $C_y$ , sono uniti tra loro con una curva. Ogni triangolo è relativo ad una diversa regolazione delle vele. Secondo questo modello

aerodinamico la curva di inviluppo può, in prima battuta, essere approssimata con un segmento tratteggiato definito da  $C_{d0}$ ,  $H_{eff}$  e  $Cl_{max}$ . Si osserva che questa modellazione descrive discretamente il comportamento reale della curva  $Cd$  vs  $Cl^2$  solo per valori di  $Cl$  inferiori a  $Cl^{no-sep}$  per i quali non è ancora presente una resistenza aggiuntiva di separazione.

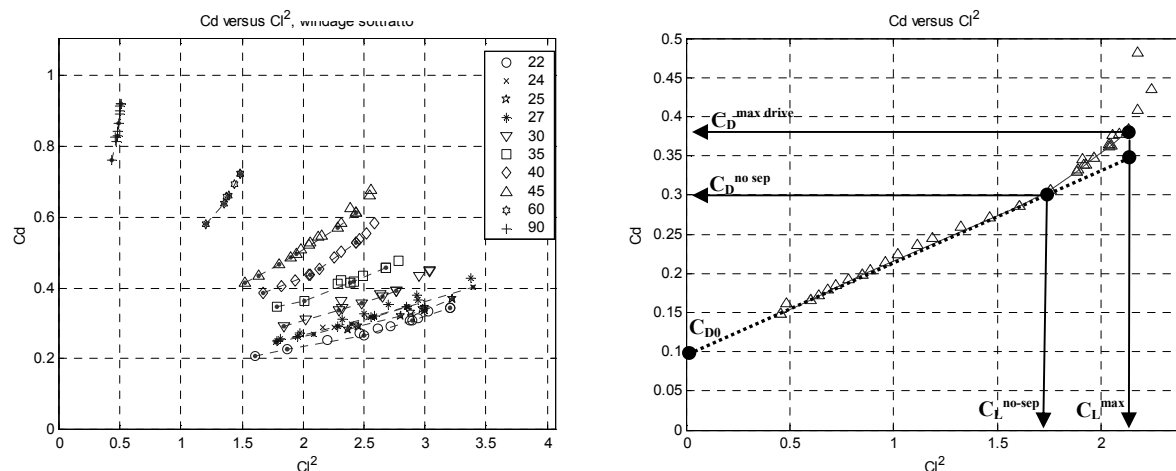


Figura 19 e 20. A sinistra l'andamento del coefficiente di resistenza ( $Cd$ ) in funzione del quadrato del coefficiente di portanza ( $Cl^2$ ) per diverse regolazioni delle vele. Le curve sono tutte ad angolo di sbandamento nullo e per angoli al vento (AWA) da 22° a 90°. A destra la linearizzazione introdotta dal modello aerodinamico IMS.

Prima di passare all'analisi dei dati, per mettere in evidenza le forze aerodinamiche sviluppate dal solo piano velico, vengono misurate (per ogni condizione di prova effettuata) le forze generate dal modello senza vele. In tal modo è possibile definire una tara dovuta allo scafo, albero, sartame, etc, che viene normalmente chiamata *windage*. Le forze di windage vengono quindi sottratte alle misure fatte precedentemente per ogni corrispondente condizione di prova.

### 2.3 Prove in andature portanti

Nelle andature portanti, la componente di sbandamento è molto contenuta. Pertanto anziché ricercare tutte quelle regolazioni delle vele che consentano di ottenere il massimo  $Cx$  relativo a diversi valori di  $Cy$ , si cerca solamente il massimo  $Cx$  assoluto, indipendentemente dal corrispondente  $Cy$ . In tal modo, per ogni AWA e angolo di sbandamento della barca, si trova una unica regolazione ottimale, anziché una curva al variare di  $Cy$ .

Poiché in andature portanti vengono utilizzate vele non inferite, quindi con una maggior libertà di forma, particolare attenzione va posta sulla velocità della vena da utilizzare durante la prova. Come detto in precedenza, per poter garantire una corretta similitudine occorrerebbe mantenere il medesimo numero di Froude che si ha al vero:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot s}} \quad (3)$$

dove  $V$  è la velocità,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $s$  lo spessore della vela.

Questo è impossibile utilizzando materiali convenzionali per costruire i modelli delle vele. Pertanto quello che si può fare è mantenere il rapporto tra le forze peso e le forze aerodinamiche "di galleggiamento" che agiscono sulla vela per consentirne la corretta regolazione. In altre parole, in funzione della densità del materiale con il quale sono realizzate le vele, si definisce la appropriata velocità della vena incidente.

A titolo di esempio, in figura 21, è presentato l'andamento dei coefficienti  $Cx$  al variare di AWA per uno spinnaker simmetrico e uno asimmetrico. Ogni punto indicato corrisponde alla regolazione con massimo  $Cx$ . Dalla figura è possibile osservare che per AWA più stretti di 105° lo spinnaker asimmetrico provato risulta spingere di più del simmetrico, il contrario per angoli più larghi di 115°.

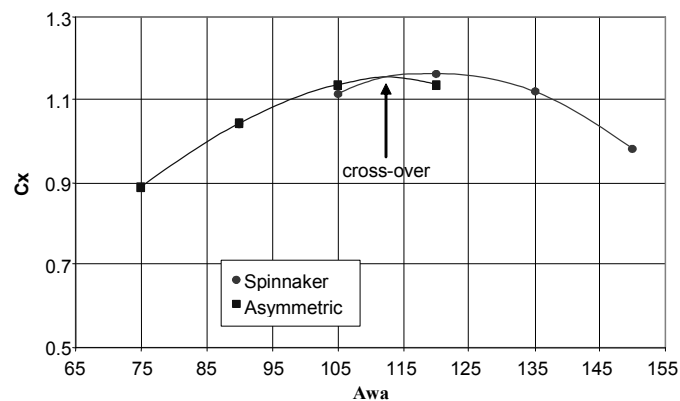


Figura 21. Il coefficiente di spinta all'avanzamento ( $C_x$ ) in funzione dell'angolo al vento (AWA) per due piani velici differenti, rispettivamente con spinnaker simmetrico e asimmetrico.

### 3 PROCEDURA DI PROVA CON MODELLO BASCULANTE

Recentemente, presso la Galleria del Vento del Politecnico di Milano, è stata messa a punto una innovativa procedura di prova. Tale procedura prevede l'utilizzo di un sistema hardware-in-the-loop (HIL), basato su un VPP in linea a 4 gradi di libertà (sono vincolati solo sussulto e beccheggio), che, mediante un servo meccanismo, fa sbandare il modello dinamicamente in risposta alle forze aerodinamiche che vengono misurate. Un sistema analogo è stato sviluppato presso l'Università di Auckland sempre per prove su imbarcazioni a vela; Jackson & Hansen, 2003.

Il modello di imbarcazione che viene utilizzato è del tutto analogo a quello descritto precedentemente per le prove convenzionali, ma in questo caso può sbandare grazie ad un servo meccanismo controllato da calcolatore.

Quest'ultimo è un attuatore lineare, realizzato appositamente, e controllato da un piccolo motore elettrico completamente programmabile. Quando il modello sbanda, lo spazio lasciato libero dal modello viene chiuso da un sottile film di lattice che non trasmette forze significative al modello, ma consente di chiudere il pavimento della galleria intorno allo scafo. In ogni caso, le forze trasmesse dal lattice al modello vengono misurate in assenza di vento, per diversi angoli di sbandamento, e poi sottratte alle misure effettuate durante la procedura di prova attraverso una polinomiale interpolante. Le forze misurate e sottratte della tara del lattice, sono trasformate in coefficienti adimensionali e forniti al VPP. Questo utilizza un modello idrodinamico convenzionale che consente, però, anche di introdurre curve di resistenza specifiche o curve di regressione ottenute da prove in vasca navale. L'algoritmo di calcolo Gauss-Newton utilizzato dal VPP deve essere inizializzato con una soluzione di primo tentativo. L'angolo di sbandamento trovato iterativamente dal VPP viene trasmesso al servo meccanismo che sbanda il modello fino a questo angolo. La soluzione viene mostrata sul video all'operatore che, attraverso la regolazione ottimale delle vele, cerca la massima velocità dell'imbarcazione, anziché la massima spinta di avanzamento come accadrebbe con una metodologia di prova convenzionale. Le forze vengono mediate su un periodo di acquisizione con la desiderata frequenza di campionamento (tipicamente 30s a 100Hz), mentre il servomeccanismo tiene fermo il modello e l'operatore non cambia regolazione.

E' possibile utilizzare diverse intensità di vento per il VPP. In figura 22 e 23, ad esempio, sono riportati i risultati per un fast-cruiser di 48 piedi che naviga con un AWA = 22° e un'intensità del vento atmosferico di 10 nodi. In figura 22 è indicata la velocità della barca (BS) e l'angolo di sbandamento (Heel) corrispondenti a diverse regolazioni delle vele. In particolare, partendo da uno sbandamento di 12°, l'operatore porta il carrello della scotta randa fino a centro barca, ottenendo così un aumento dello sbandamento e della velocità. Portando ancora il carrello fino alla fine della rotaia (sopravento) si ottiene un ulteriore incremento dello sbandamento e della velocità. Successivamente si tesa la scotta della randa e si ottiene un incremento dello sbandamento ma una drastica diminuzione della velocità. In figura 23, per le medesime regolazioni della figura

precedente, sono presentati gli angoli di timone e il momento di imbardata (attorno all'asse verticale). E' possibile verificare che, all'aumentare del momento, diviene necessario un maggiore angolo di timone.

Questa procedura di prova consente un notevole guadagno di tempo per via del ridotto numero di misure sperimentali necessarie rispetto alla procedura convenzionale. Infatti, con la procedura di prova convenzionale, per ogni AWA è necessario effettuare tante misure sperimentali quante per costruire l'intera matrice di coefficienti  $C_x$ - $C_y$  al variare dell'angolo di sbandamento e delle diverse regolazioni. Diversamente, con questa procedura, la coppia di valori  $C_x$ - $C_y$  viene immediatamente identificata e quindi è necessaria una sola acquisizione per ogni AWA e ogni intensità del vento reale.

In figura 24 si mostra un confronto tra la metodologia convenzionale illustrata precedentemente e quella con modello basculante per  $AWA = 22^\circ$ . Le curve blu sono gli involuপি di  $C_x$  su  $C_y$  ottenute con la procedura di prova convenzionale a barca dritta (curva sopra) e angolo di sbandamento di  $30^\circ$  (curva sotto). L'insieme di questi dati potrà essere successivamente analizzato da un VPP fuori linea. Diversamente i due rombi sono stati direttamente ottenuti con il sistema HIL con VPP in linea, rispettivamente per un'intensità del vento atmosferico di 5 e 20 nodi. In figura sono anche riportati i corrispondenti valori di sbandamento (H) e velocità (BS). Come si può osservare, con una brezza leggera di 5 nodi lo sbandamento è ridotto e la regolazione ottimale corrisponde a valori di  $C_x$  prossimi al massimo assoluto, al contrario, con vento teso di 20 nodi e grandi angoli di sbandamento, la massima velocità è ottenuta per valori di  $C_x$  inferiori.

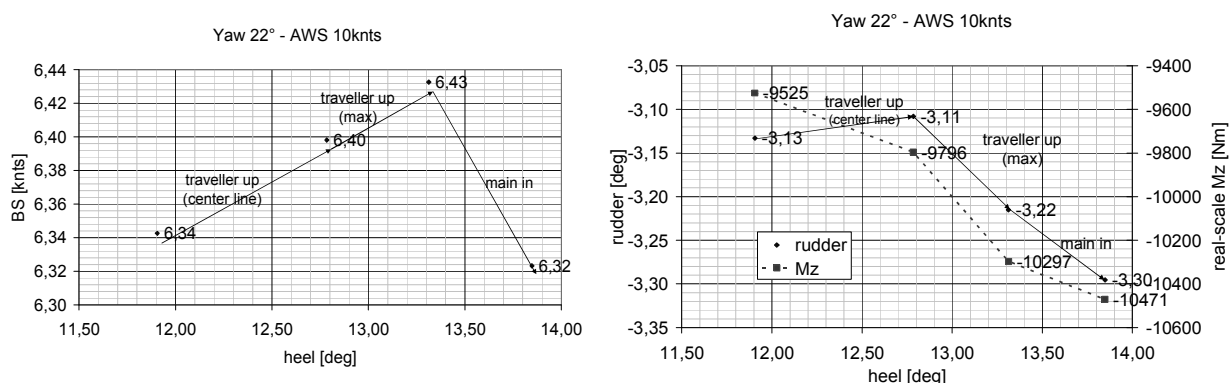


Figura 22 e 23. A sinistra l'andamento della velocità (BS) in funzione dell'angolo di sbandamento (Heel) per una successione di regolazioni della randa. A destra i corrispondenti valori dell'angolo di timone (rudder) e momento di imbardata ( $M_z$ ).

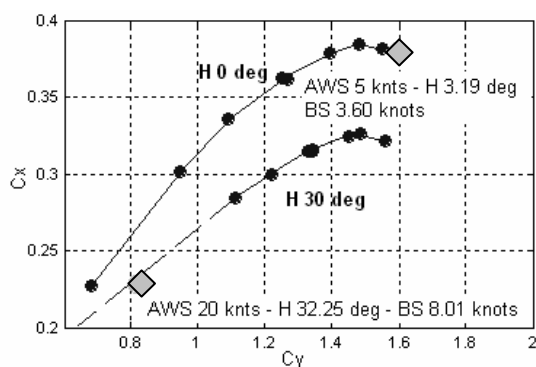


Figura 24. Coefficiente di spinta all'avanzamento ( $C_x$ ) e di forza laterale ( $C_y$ ) per diverse regolazioni delle vele. Le due curve, generate con la modalità di prova convenzionale, sono entrambe ad angolo al vento di  $22^\circ$  e rispettivamente per angoli di sbandamento nullo e  $30^\circ$ . I due rombi in neretto sono i valori ottenuti con modello basculante per un angolo al vento di  $22^\circ$  e rispettivamente 5 e 20 nodi di velocità del vento apparente (AWS).

Si osserva che questa metodologia risulta particolarmente adatta per confrontare in modo diretto diversi tagli di vele o diversi piani velici, procedura altrimenti particolarmente onerosa sia economicamente, sia in termini di tempo. Infine, con questa procedura è possibile ottimizzare

facilmente l'assetto di imbarcazioni con chiglie basculanti o altri sistemi di zavorra mobile poichè è possibile intervenire in linea sul modello idrodinamico.

#### 4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- F. Fossati, A. Zasso, I. M. Viola (2006). Realizzazione di un dispositivo per la generazione di “Twisted Flow” per prove su imbarcazioni a vela in Galleria del Vento, *Proceedings of IN-VENTO-2006*, Pescara, 18-21 giugno 2006.
- J. M. C. Campbell, A. R. Cloughton (1994). Wind Tunnel Testing of Sailing Yacht Rigs, *13<sup>th</sup> HISVA symposium*, Amsterdam.
- A. R. Cloughton, J. F. Wellicome, R. A. Sheno (1998). *Sailing Yacht Design – Theory*. Longman, Harlow (England). ISBN 0-582-36856-1.
- P. S. Jackson, H. Hansen (2003). Real time VPP for wind tunnel testing of sailing yachts, *Proceedings of the Modern Yacht Conference*, Southampton, 17-18 September 2003.